

激光与光电子学进展

基于温度控制的可切换宽带太赫兹吸波器

朱广^{1,2,3*}, 霍跃华⁴, 史艳琼^{1,2,3}¹安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601;²安徽建筑大学建筑机械故障诊断与预警重点实验室, 安徽 合肥 230601;³工程机械智能制造重点实验室, 安徽 合肥 230601;⁴中国矿业大学(北京)网络与信息中心, 北京 100083

摘要 为了实现宽带吸波器的动态可调功能,设计出一种由顶层“方环内嵌十字”、二氧化硅介质层以及二氧化钒薄膜底层组成的对称吸波器结构。在 2~4 THz 范围内,通过调节二氧化钒薄膜底层的电导率可以实现由低于 10% 的吸收效率调整至高于 90% 的吸收效率,切换调制深度大于 65%。在宽频带范围内,可以实现动态切换该器件的反射和完美吸收功能。仿真结果表明,该吸波器具有宽角度特性和极化不敏感特性,入射角度范围达到 75°。基于以上优点,该吸收器在智能衰减器、反射器以及空间调制器等太赫兹器件应用方面有巨大的潜力。

关键词 材料; 二氧化钒; 宽带吸收器; 可切换功能; 极化不敏感特性; 太赫兹

中图分类号 TB34

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1316001

Switchable Broadband Terahertz Absorber Based on Temperature Control

Zhu Guang^{1,2,3*}, Huo Yuehua⁴, Shi Yanqiong^{1,2,3}

¹*School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China;*

²*Key Laboratory of Construction Machinery Fault Diagnosis and Early Warning Technology, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China;*

³*Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Construction Machinery, Hefei, Anhui 230601, China;*

⁴*Network and Information Center, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China*

Abstract To realize the dynamic adjustable function of the broadband absorber, this paper proposes and designs a symmetrical absorber structure composed of a square top layer with embedded cross, a SiO₂ dielectric layer, and a VO₂ bottom layer. In the range from 2 THz to 4 THz, the absorption efficiency of the device can be adjusted from less than 10% to more than 90% by adjusting the conductivity of the bottom layer of VO₂, and its switching modulation depth is greater than 65%. In a wide frequency range, the device can be dynamically switched between the reflector and perfect absorber modes. The simulation results show that the absorber has wide-angle and polarization-insensitive characteristics, and the incident angle range of electromagnetic waves to the absorber can reach 75°. Based on the above advantages, the absorber has great potential in terahertz device applications such as smart attenuators, reflectors, and spatial modulators.

收稿日期: 2021-01-08; 修回日期: 2021-03-29; 录用日期: 2021-04-07

基金项目: 安徽省高校协同创新计划项目(GXXT-2019-020)、国家重点研发计划项目(2018YFB2003801)

通信作者: *guangzhu@ahjzu.edu.cn

Key words materials; vanadium dioxide; broadband absorber; switchable function; polarization insensitive characteristics; terahertz

OCIS codes 160.3918; 300.1030; 040.2235

1 引言

近年来,太赫兹(THz)技术在通信^[1]、成像^[2]、检测^[3-4]、安全生产^[5-6]等领域中备受关注。超材料因其优良的特性,已被广泛应用于各种太赫兹器件的设计中^[7-9]。2008年Landy等^[10]在设计完美电磁吸收器时首次使用超材料,所提出的人工电磁材料吸收器为电磁波吸收结构的研究提供了新的设计方法,解决了传统吸收器必须工作在1/4波长处的难题。自此以后,微波到光波段中种类繁多的吸收结构设计相继出现。目前提出的单频、双频或者多频吸收器在设计定型后,工作频率以及吸收性能无法改变,极大地限制了其应用范围。在实际应用中,具有宽频带、可切换功能^[11]的吸收器能够利用外界条件实现不同的吸收性能,因而成为研究热点。

二氧化钒(VO_2)是一种可逆相变材料,也是目前可重构超材料的研究重点,研究人员已制备出透明吸收体、双宽带吸收体、宽-窄带切换器件等^[12]。本文利用 VO_2 的特性设计了一种温控切换宽带太赫兹吸收器,区别于通过堆叠多层材料实现宽带吸收的效果,所设计的吸收器采用三层结构,进一步减小了介质层厚度^[13-14],并在减小器件尺寸的同时实现宽带吸收。利用单层 VO_2 代替传统的金属作为基板,通过调节底层 VO_2 的状态实现在宽频带内全反射状态和全吸收状态的切换。根据不同温度下 VO_2 的状态不同,底层表现为绝

缘态或金属态,太赫兹频段宽频带内表现为全反射状态(“关闭”)或全吸收状态(“开启”),实现了吸收器的可调功能。当 VO_2 处于金属状态时,该结构开启,表现为完美宽带吸收器,当 VO_2 处于绝缘状态时,该结构处于关闭状态,此时切换为反射器。所设计的吸收器采用常见材料二氧化硅作为介质层,有助于后续的加工,结构尺寸为微米级别,厚度更薄,体积更加小型化;吸收器结构为三层正方形结构,有利于后续将多个吸收器排列成阵列,实现超宽带吸收。

2 吸收器结构模型理论与设计

2.1 理论基础

VO_2 是一种具有优良可逆绝缘导电相变特性的材料^[15-16],因其独特的金属体与绝缘体之间的可逆相变特性成为相变材料领域的研究热点。实际生活中通过加热、降温等方式很容易达到 VO_2 的相变温度 $68\text{ }^\circ\text{C}$ 。常温时 VO_2 为单斜晶体结构,当温度升高至 $68\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时, VO_2 转变为四方红金石结构,表现为金属态;当温度降低到 $68\text{ }^\circ\text{C}$ 以下($62\text{ }^\circ\text{C}$)时, VO_2 再次转为单斜晶体结构,此时呈现绝缘态。在升温 and 降温的过程中, VO_2 的光电特性均发生明显变化,并且由于相变的滞后性,相变发生在不同的温度段。

常用Maxwell-Garnett理论和有效媒质理论(EMT)^[17]描述 VO_2 相变性质,表达式为

$$\epsilon_{\text{eff}}^{\text{BR}} = \frac{1}{4} \left[\epsilon_a (2 - 3f_{\text{VO}_2}) + \epsilon_b (3f_{\text{VO}_2} - 1) + \sqrt{8\epsilon_a \epsilon_b + \epsilon_a (2 - 3f_{\text{VO}_2}) + \epsilon_b (3f_{\text{VO}_2} - 1)^2} \right], \quad (1)$$

式中: $\epsilon_{\text{eff}}^{\text{BR}}$ 为 VO_2 的相变特性函数; ϵ_a 为绝缘态的介电常数; ϵ_b 为完全处于金属状态时 VO_2 的介电函数; f_{VO_2} 为金属相晶体与 VO_2 的体积比值。 VO_2 在太赫兹波段可以等价于无损介质,并且介电常数 $\epsilon_a = 9$, ϵ_b 与频率 ω 的关系可用Drude模型描述

$$\epsilon_b(\omega) = \epsilon_{(\infty)} - \frac{\omega_p^2(\sigma)}{\omega(\omega + i/\tau)}, \quad (2)$$

式中: $\epsilon_{(\infty)}$ 为 VO_2 的高频极限介电常数, $\epsilon_{(\infty)} = \epsilon_a = 9$;等离子频率 $\omega_p^2 = Ne^2/(\epsilon_0 m^*)$; σ 为 VO_2 的电导率;弛豫时间 $\tau = m^* \mu / e = 2.27\text{ fs}$;载流

子迁移率 $\mu = 2\text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$;载流子浓度 $N = 8.7 \times 10^{21}\text{ cm}^{-3}$;有效质量 $m^* = 2m_e$;电子电荷 $e = 1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$;真空中的介电常数 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\text{ F/m}$ 。

VO_2 的介电常数为 $\epsilon_b = \epsilon_{b1} + i\epsilon_{b2}$,利用相对介电常数可以求出材料的电导率,二者之间的关系为

$$\sigma_m = -i\epsilon_0 \omega (\epsilon_b - 1). \quad (3)$$

VO_2 的 f_{VO_2} 与温度 T 的关系为

$$f(T) = f_{\text{VO}_2\text{-max}} \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \exp[(T - T_0)/\Delta T]} \right\}, \quad (4)$$

式中: T 为外界温度; T_0 为相变温度; ΔT 为相变过渡温度; 相变过程中金属相晶体与 VO_2 的最大体积比值 $f_{\text{VO}_2\text{-max}}$ 为 0.95。

结合以上公式, 不同温度时 VO_2 电阻膜的电导率变化如图 1 所示。 VO_2 由绝缘态变成金属态的临界温度 T_0 为 68°C 。升温过程中, VO_2 从绝缘态转变为金属态; $T = 62^\circ\text{C}$ 时, VO_2 从金属态转变为绝缘态, ΔT 为 6°C 。升温或降温过程中, VO_2 完全处于绝缘态时介电常数为固定值; 完全处于金属态时介电常数和电导率只与入射频率有关^[18]。表 1 所示为降温、升温过程中部分温度下 VO_2 电阻膜的电导率。

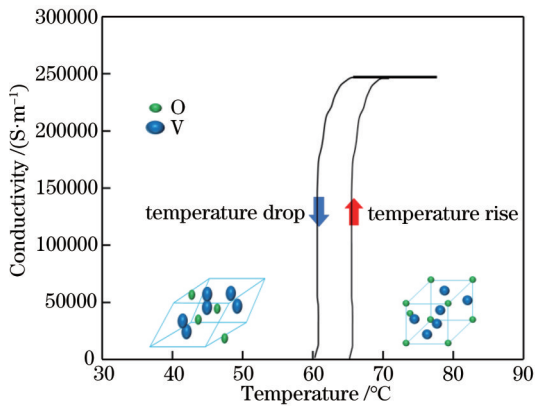


图 1 温度不同时 VO_2 的电导率以及晶体结构变化
Fig. 1 Changes in conductivity and crystal structure of VO_2 at different temperatures

表 1 不同温度时 VO_2 电阻膜的电导率
Table 1 Conductivity of VO_2 resistive film at different temperatures

Temperature / $^\circ\text{C}$	33	58	65	67	78
Conductivity / $(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	300	820	27600	158000	212000

2.2 吸波器结构模型设计

图 2 为所设计的三层“方环内嵌十字”宽带吸波器单元结构示意图。第一层为金属贴片谐振层, 调

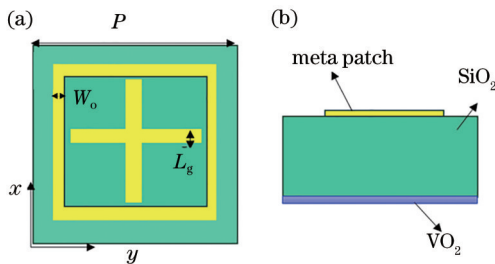


图 2 可切换宽带吸波器结构图。(a)俯视图;(b)侧视图
Fig. 2 Switchable broadband absorber structure diagram.
(a) Top view; (b) side view

整金属结构的尺寸, 从而实现阻抗匹配, 选择贵金属作为金属层, 电导率为 $4.09 \times 10^7 \text{ S/m}$; 中间层为介质层, 介质基体采用介电常数为 3.9 的二氧化硅, 厚度为 $10 \mu\text{m}$, 可为电磁波的损耗提供空间; 第三层为 VO_2 背板层, 将相变材料 VO_2 作为底层反射基板, 厚度为 $0.2 \mu\text{m}$ 。通过调节外部温度使 VO_2 由绝缘态转为全导电的金属态, 底层具有完全反射特性。具体尺寸参数如下: 边长 $P = 10 \mu\text{m}$, 十字贴片宽度 $L_g = 1 \mu\text{m}$, 方环宽度 $W_0 = 10 \mu\text{m}$, 工作频率为 $2\sim 4 \text{ THz}$ 。

3 仿真结果分析

为了分析所设计吸波器单元的结构性能, 选择商业软件 CST MICROWAVE STUDIO 对吸波器结构进行仿真, 开放边界 (open add space) 为 z 方向上的边界条件, 元胞边界 (unit cell) 为 x, y 边界, 利用频率求解器 (frequency domain solver) 模拟得到透射系数 S_{21} 和反射系数 S_{11} 。根据吸收效率公式 $A = 1 - S_{11}^2 - S_{21}^2$ 计算得到吸收效率。

为了研究所设计吸波器的吸收效率与电导率之间的关系, 将环境温度从 33°C 逐渐增加至 80°C , 即将 VO_2 的电导率从 300 S/m 增加到 300000 S/m , 结果如图 3 所示。当温度高于 68°C 时, 底层 VO_2 表现为完全金属态, 电磁波在金属表层产生趋肤效应, 且在该频段内趋肤深度远小于底层基板的厚度, 光线入射到底层时透射率为 0, 故吸收率可简化为 $A = 1 - S_{11}^2$ 。在 $2\sim 4 \text{ THz}$ 频率范围内, 随着电导率的增加, 宽带吸收率由低于 10% 增加至高于 90% , 在此过程中所设计的吸波器由反射器切换为吸收器, 表明在 $2\sim 4 \text{ THz}$ 的频率范

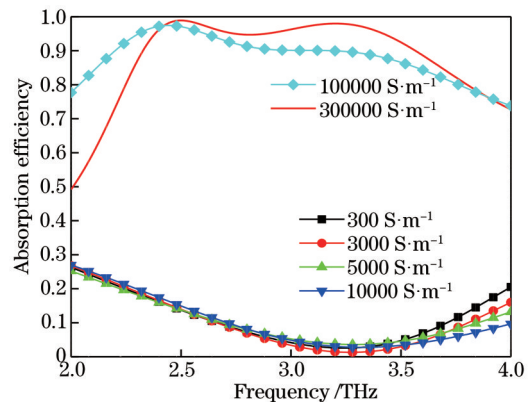


图 3 不同电导率下吸收效率的变化
Fig. 3 Changes of absorption efficiencies under different conductivities

围内可以实现宽带可调的效果,且调制深度大于 65%。同时 VO₂处在金属态时,该吸收器的平均吸收效率在 95% 以上,在 2.5 THz 和 3.4 THz 处的吸收效率可达到 100%,实现了完美吸收,并且吸收带宽比为 85%,实现了宽带吸收。因此,该吸波器能够根据不同需求实现灵活切换,具有较强的灵活性和实用性。

介电常数直接影响吸收性能,为了深入分析该吸波器可切换的工作原理,首先仿真了吸收效率随 VO₂介电常数的变化关系。利用 MATLAB 软件计算得到不同电导率下 VO₂介电常数的实部和虚部,如图 4 和图 5 所示。电导率不同时,介电常数的实部均小于虚部,而介电常数的实部影响谐振频率,非零虚部的存在产生电磁损耗。吸收峰处介电常数变化趋势与电导率数值变化趋势一致,表明在 VO₂的可逆相变过程中,该可切换宽带吸波器的吸

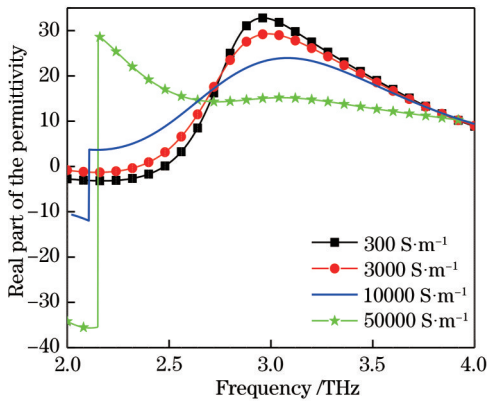


图 4 不同电导率下介电常数的实部
Fig. 4 The real part of the permittivity at different conductivities

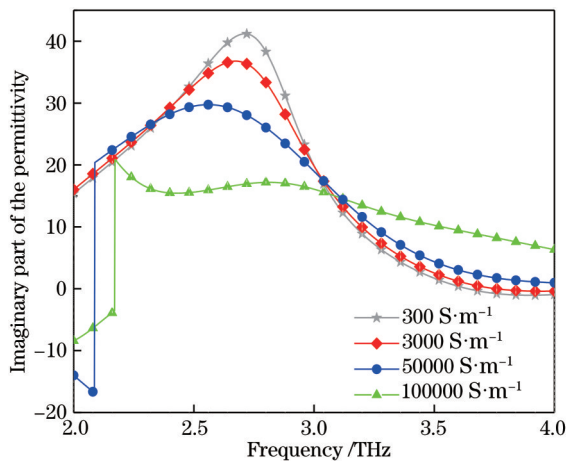


图 5 不同电导率下介电常数的虚部
Fig. 5 The imaginary part of the permittivity at different conductivities

收峰所在频率几乎不发生变化,但吸收效率有着明显的改变,因此,在整个吸收频率范围内实现了反射器与吸收器的动态切换。

接着,从阻抗匹配的角度分析了该吸波器实现可切换的工作原理。阻抗匹配原理可以有效解释吸波器产生吸收效果的原因。当电磁波垂直入射时,吸波器的反射效率可以表示为^[19]

$$S_{11} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}, \quad (5)$$

式中: Z 为表面输入阻抗; Z_0 为自由空间阻抗。当二者相等,即 $Z_0 = Z$ 时,相对阻抗 $z = 1$,反射效率 $R(\omega) = 0$,吸收的幅值达到最大值。根据经典阻抗匹配理论以及 S 参数反演法^[20],利用得到的反射、透射系数反向计算出吸收器的表面等效折射率 n 和相对阻抗 z ,即

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (6)$$

$$n = \pm \frac{1}{kd} \arccos \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 + S_{21}^2 - S_{11}^2) \right], \quad (7)$$

式中: k 为波数; d 为吸波器的厚度。(6)式和(7)式分别需要满足 $\text{Re}(z) \geq 0$ 和 $\text{Im}(n) \geq 0$ 。

金属状态下可切换宽带吸波器的吸收率曲线以及表面相对阻抗即 z 的实部和虚部变化如图 6 所示,在工作频段内, z 的实部约为 1, z 的虚部约为 0,即 $z \approx 1$,与自由空间阻抗数值近似相等,达到阻抗匹配的标准。金属贴片谐振层减少了入射电磁波在表面的反射,绝大部分入射波进入吸收器内,与此同时,底层金属态的 VO₂基板又能够有效阻止电

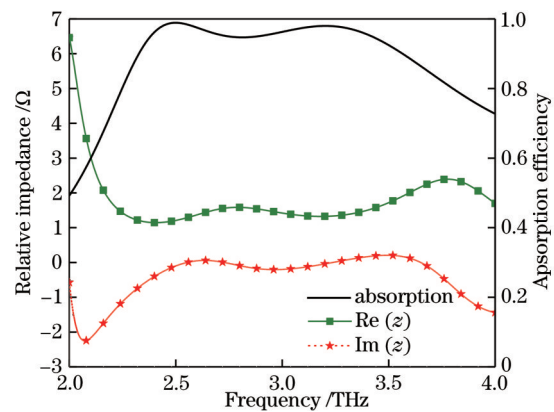


图 6 高温条件下吸波器相对阻抗实部、虚部以及吸收效率曲线

Fig. 6 The real part and imaginary part of relative impedance and absorption efficiency curve of absorber under high temperature conditions

磁波的透射,内部有损结构损耗了大部分电磁波能量,从而呈现宽带吸收的效果。

图 7 和图 8 所示分别为 VO₂ 底层薄膜在不同电导率时的相对阻抗 z 实部和虚部的变化曲线。可以看到,在 2.5~3.5 THz 范围内,当逐渐增加环境温度时,电导率增大,导致 z 的实部逐渐接近 1,虚部逐渐接近 0,即有效阻抗与自由阻抗匹配,进一步表明可以通过改变底层 VO₂ 的电导率,实现由反射器状态向吸波器状态转换。

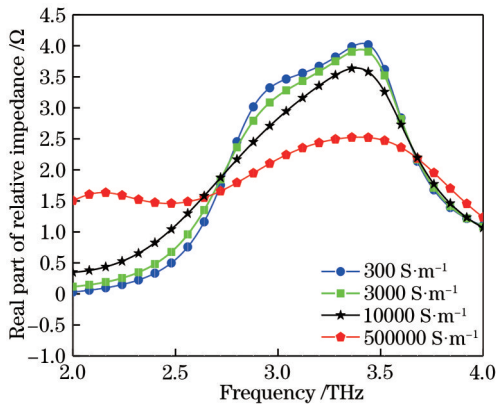


图 7 不同电导率下表面相对阻抗的实部

Fig. 7 The real part of the surface relative impedance at different conductivities

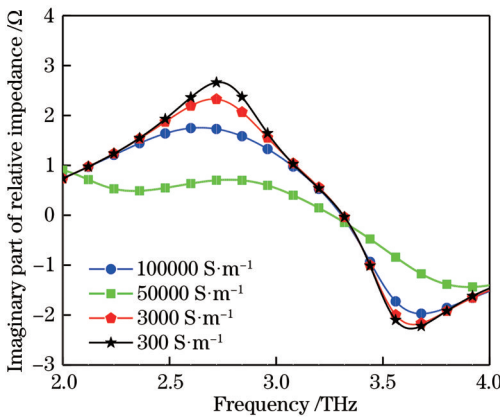


图 8 不同电导率下表面相对阻抗的虚部

Fig. 8 The imaginary part of the surface relative impedance at different conductivities

对于超材料吸收器,不同极化角度以及不同入射角度下的吸收效率不敏感性有非常重要的意义。环境温度大于相变温度时为高温环境,VO₂ 薄膜底层为完全金属态,吸波器具有完美吸收特性。图 9 所示为电磁波垂直入射时,可切换宽带吸波器的吸收、透射、反射效率曲线。其中五边形标记实线、星形标记实线和正三角标记实线分别表示电场方向

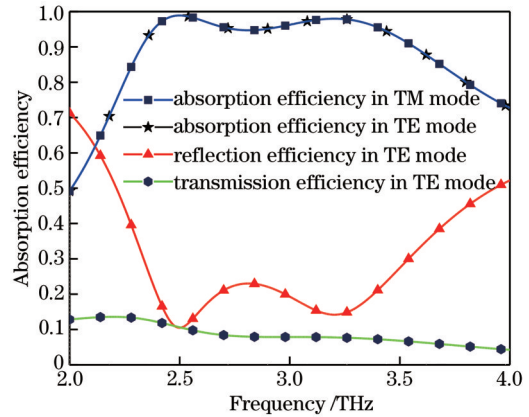


图 9 金属态下电磁波垂直入射时,可调宽带吸波器的透射、吸收、反射曲线

Fig. 9 The transmission, absorption, and reflection curves of the adjustable broadband absorber under the vertical incidence of electromagnetic waves in the metal state

沿 x 轴方向 (TE 模式)^[21] 时的透射效率、吸收效率和反射效率;正方形标记实线表示电场方向沿 y 轴方向 (TM 模式) 的吸收效率。在 TE 极化和 TM 极化下,电磁波的吸收率曲线重合,同时反射效率低于 20%,传输幅值低于 10%,证明了该吸波器具有极化不敏感特性。

为进一步验证该吸波器在入射波不同极化模式下的性能一致性,分别设置极化入射角为 0°、30°、60° 和 90°,仿真结果如图 10 所示。可以看到,在不同的电磁波极化入射角度下,吸收率曲线相同。因此,该吸收器具有良好的极化不敏感特性。

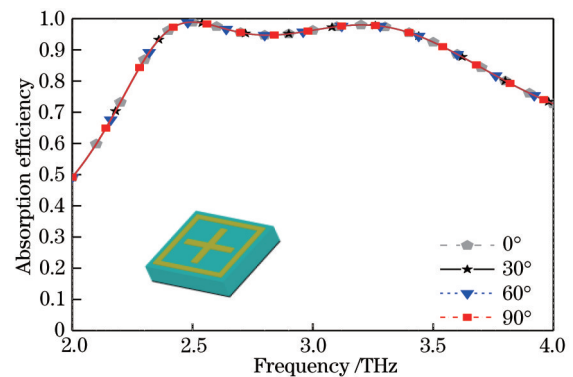


图 10 不同极化角下的吸收曲线

Fig. 10 Absorption curves at different polarization angles

一般情况下吸收效率与电磁波入射角度有关,图 11 和图 12 所示分别为 TE 和 TM 模式下不同入射角度的吸收曲线。TE 模式下,入射角度在 0°~75°,吸收峰频率几乎不变,表明宽带吸收的频率保持在工作范围内。但当入射角度大于 75°时,由于顶

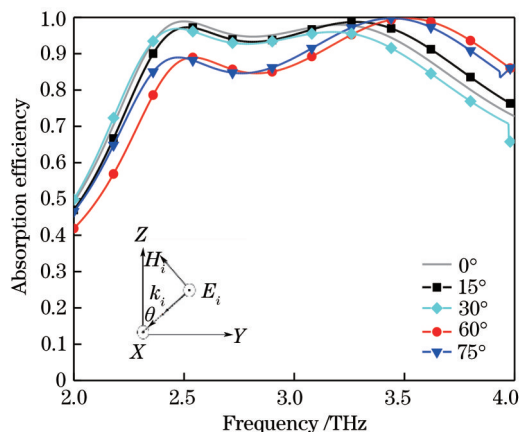


图 11 TE 模式下不同入射角的吸收曲线

Fig. 11 Absorption curves at different incident angles in

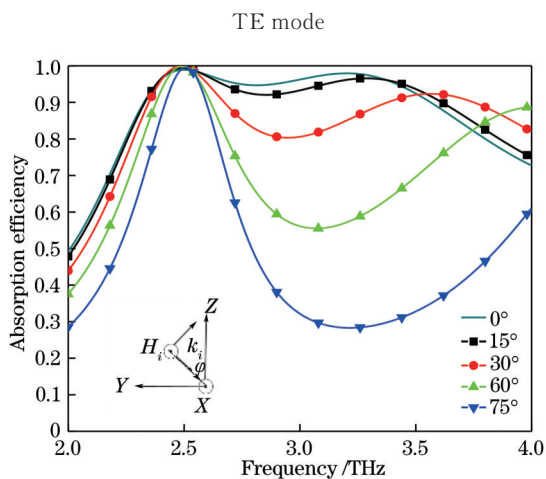


图 12 TM 模式下不同入射角的吸收曲线

Fig. 12 Absorption curves at different incident angles in

TM mode

层金属结构的共振现象产生了吸收效果^[22-23],因此电场切向方向分量随着极化入射角度的增加而减小,破坏了谐振的产生;当电磁波处于TM极化模式,在2.5 THz处,不同入射角度的吸收率相同。随着入射角的增大,由于光程的变化对入射波的干涉产生影响,在高频处产生了寄生谐振,导致吸收峰频率发生蓝移。由于在TM模式下,电磁波入射时磁场 \boldsymbol{H} 仅有横向分量,而电场 \boldsymbol{E} 既有横向分量又有纵向分量,参与谐振的只有电场的横向分量而其纵向分量不参与谐振,因此随着入射角度的增大,参与谐振的电场减小,TM模式下宽角度入射特性相比于TE模式变差^[24-26]。总之,该吸波器在TE模式下具有75°以内的优良宽入射角性能。

4 结 论

设计出一种温控切换宽带太赫兹吸波器,利用

VO_2 代替传统吸波器的金属底层,顶层和介质层分别为金属谐振层以及高损耗二氧化硅层。通过改变环境温度将相变材料 VO_2 薄膜由绝缘态转换为具有优良导电特性的金属态, VO_2 底层在透射-反射状态切换,“开启”和“关闭”两状态实现宽频带内反射器和吸收器之间的切换,转换特性理想。仿真结果表明,该吸波器具有完美宽带吸收、极化不敏感、宽入射角度、可切换谐振等优点,在太赫兹开关等太赫兹器件设计领域内具有巨大的应用潜力,可广泛用于调制器、光电开关等高性能太赫兹设备的制备。

参 考 文 献

- [1] Koenig S, Lopez-Diaz D, Antes J, et al. Wireless sub-THz communication system with high data rate [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(12): 977-981.
- [2] Hao S B, Zhang Z L, Ma Y Y, et al. Terahertz lens fabricated by natural dolomite[J]. *Chinese Physics Letters*, 2019, 36(12): 44-46.
- [3] Jia C Y, Chang T Y, Fan W, et al. Attenuation characteristics of terahertz wave penetrating coals[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(S1): 298-302. 贾成艳, 常天英, 樊伟, 等. 太赫兹波穿透煤层的衰减特性[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(S1): 298-302.
- [4] Wang G M. Design and application of the electromagnetic metamaterials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011: 1-5. 王国明. 电磁超介质的设计及其应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2011: 1-5.
- [5] Liu L Y, Yang C F, Zhang X S, et al. Relationship between moisture and dielectric properties of coal at terahertz band electromagnetic radiation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(2): 497-501. 刘陵玉, 杨传法, 张献生, 等. 太赫兹波段煤的湿度与介电特性关系[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(2): 497-501.
- [6] Wang X, Zhao D, Hu K X, et al. Terahertz spectrum characteristics of bituminous coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 1146-1154. 王昕, 赵端, 胡克想, 等. 烟煤的太赫兹光谱特性研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(4): 1146-1154.
- [7] Li J K, Chen Z Q, Yang H, et al. Tunable broadband solar energy absorber based on monolayer transition metal dichalcogenides materials using Au nanocubes[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(2): 257.
- [8] Ju L, Gu K D, Liu Y J, et al. Wideband perfect absorption based on metamaterial in near-infrared range[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*,

- 2020, 142: 109439.
- [9] Shen T, Pan W, Li Y, et al. Design and characteristics analysis of terahertz ultra-narrow band absorber based on metamaterial[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2020, 41(5): 648-651, 657.
沈涛, 潘武, 李焱, 等. 基于超材料的太赫兹超窄带吸收器设计及特性分析[J]. *半导体光电*, 2020, 41(5): 648-651, 657.
- [10] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [11] Fan R, Hou Y B, Guo Q H, et al. Technology temperature compensation technology of the methane sensor with tunable semiconductor laser spectrum absorption[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 226-231.
樊荣, 侯媛彬, 郭清华, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱式甲烷传感器温度补偿技术[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 226-231.
- [12] Chu Q Q, Song Z Y, Liu Q H. Omnidirectional tunable terahertz analog of electromagnetically induced transparency realized by isotropic vanadium dioxide metasurfaces[J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(8): 082203.
- [13] Huang J, Li J N, Yang Y, et al. Active controllable dual broadband terahertz absorber based on hybrid metamaterials with vanadium dioxide[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7018-7027.
- [14] Bu Y. Synthesis of high-quality VO₂ thin film and its application in devices[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2018: 31-36.
卜毅. 二氧化钒(VO₂)薄膜生长及其器件应用研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2018: 31-36.
- [15] Song Z Y, Chen A, Zhang J H. Terahertz switching between broadband absorption and narrowband absorption[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 2037-2044.
- [16] Li D M, Yuan S, Yang R C, et al. Dynamical optical-controlled multi-state THz metamaterial absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0816001.
李达民, 袁苏, 杨荣草, 等. 动态光调控多态太赫兹超材料吸收器[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0816001.
- [17] Cui Z J, Wang Y, Zhu D Y, et al. Perfect absorption conditions and absorption characteristics of terahertz metamaterial absorber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614023.
崔子健, 王玥, 朱冬颖, 等. 太赫兹超材料吸收器的完美吸收条件与吸收特性[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614023.
- [18] Zhang Q, Bai L H, Bai Z Y, et al. Theoretical analysis and design of a near-infrared broadband absorber based on EC model[J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8910-8917.
- [19] Li J S, Sun J Z. Umbrella-shaped graphene/Si for multi-band tunable terahertz absorber[J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(9): 183.
- [20] Liu C. Study on terahertz tunable metamaterial absorbers[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2019: 20-22.
刘畅. THz可调超材料吸波器研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019: 20-22.
- [21] Wang T L, Zhang H Y, Zhang Y P, et al. A bi-tunable switchable polarization-independent dual-band metamaterial terahertz absorber using VO₂ and Dirac semimetal[J]. *Results in Physics*, 2020, 19: 103484.
- [22] Zhong M, Jiang X T, Zhu X L, et al. Modulation of the absorption properties of a dual band metamaterial based on VO₂ thin films[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 104: 103114.
- [23] Prasad V P, Ramirez F V, Papakonstantinou I, et al. Thermoresponsive black VO₂-carbon nanotube composite coatings for solar energy harvesting[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(9): 8848-8857.
- [24] Wang Y, Xuan X F, Zhu L, et al. Multilayer rectangular broadband metamaterial absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1523001.
王杨, 轩雪飞, 朱路, 等. 多层矩形宽波段超材料吸收器[J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1523001.
- [25] Meng Q L, Zhang Y, Zhang B, et al. Characteristics of optically tunable multi-band terahertz metamaterial absorber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(10): 101603.
孟庆龙, 张艳, 张彬, 等. 光控可调谐多频带太赫兹超材料吸收器的特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(10): 101603.
- [26] Wang Y R, Liang L J, Yang M S, et al. Terahertz metamaterial based on controllable electromagnetic induced transparency structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041603.
王娅茹, 梁兰菊, 杨茂生, 等. 一种光控的电磁诱导透明太赫兹超材料[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041603.